



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

SROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV TITANU, NIKLU A STŘÍBRA, VYUŽÍVANÝCH V POLOVODIČOVÉ TECHNOLOGII

COMPARISON OF PROPERTIES OF THIN LAYERS OF TITANIUM, NICKEL AND SILVER
USED IN SEMICONDUCTOR TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Dorotík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Edita Hejátková

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: David Dorotík

ID: 174278

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Srovnání vlastností tenkých vrstev titanu, niklu a stříbra, využívaných v polovodičové technologii

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy nanášení tenkých vrstev Ti (titanu), Ni (niklu) a Ag (stříbra) metodami PVD (Physical Vapor Deposition). Prostudujte způsoby přípravy křemíkové desky pro nanášení těchto vrstev. Vyhodnoťte vlastnosti vrstev pro využití v polovodičovém průmyslu a vliv těchto vrstev na elektrické parametry polovodičových struktur.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 31.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Edita Hejátková

Konzultant: Ing. Dorotík Martin, ON SEMICONDUCTOR CZECH REPUBLIC, s.r.o., Rožnov pod Radhoštěm

doc. Ing. Jiří Háze,
Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářské práce byla spojená s poznáním všeobecné problematiky nanášení tenkých vrstev metodami napařování a naprašování. Přípravou substrátu a jeho čištění před deponováním tenkých vrstev. Práce byla zaměřena na vlastnosti těchto tenkých vrstev v polovodičové technologii.

KLÍČOVÁ SLOVA

Napařování, naprašování, polovodičová technika, tenké vrstvy.

ABSTRACT

Bachelor theses were connected with knowledge of general problems of application of thin films by methods of sputtering and evaporation. Prepare the substrate and clean it before depositing thin layers. The work was focused on the properties of these thin films in semiconductor technology.

KEYWORDS

. Sputtering, evaporation, semiconductor technology, thin films

DOROTÍK, d. *Srovnání vlastností tenkých vrstev titanu, niklu a stříbra, využívaných v polovodičové technologii*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2018. 11 s., 0 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Edita Hejátková.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Srovnání vlastností tenkých vrstev titanu, niklu a stříbra využívaných v polovodičové technologii jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Editě Hejátkové za účinnou metodickou a pedagogickou pomoc, dále konzultantovi Ing. Vojtěch Dlabaja za jeho odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

seznam obrázků	1
Seznam tabulek	2
Úvod	3
1 tenká vrstva	4
1.1 Tenká vrstva.....	4
1.2 Použití tenkých vrstev.....	4
1.3 Vytváření tenkých vrstev	5
1.3.1 CVD (Chemical Vapor Deposition)	6
1.3.2 PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition)	7
1.3.3 PVD (Physical Vapor Deposition).....	7
1.4 Podložky (substráty)	7
2 polovodičová technologie	9
2.1 Historie.....	9
2.2 Fyzika polovodičové prvků	9
2.3 Polovodičové prvky	11
2.3.1 Dioda.....	11
2.3.2 Bipolární tranzistor	12
2.3.3 MOS tranzistory.....	12
2.3.4 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) tranzistor	13
2.3.5 zadní strana pro součástky IGBT	14
3 materiály, metody a použité zařízení	15
3.1 CHA MARK 50	15
3.2 Balzers LLS – 801	16
3.3 Měření tloušťky	17
3.3.1 Křemíková deska (wafer).....	18
3.3.2 Hliník, Titan, Nikl a stříbro	19
4 Testy zpracovaných desek	21
4.1 Testování tloušťky	21

4.2	Peeling test.....	22
4.3	Test VDSO.....	24
závěr		29
Literatura		31

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Ukázka objemového materiálu a povrchové vrstvy (převzato z [1], dodatečně pozměněn).....	4
Obrázek 1-2 Základní depoziční procesy (převzato z [2]).	5
Obrázek 1-3 Příprava vrstvy u PVD a CVD metod (převzato z [2]).	5
Obrázek 1-4 Schéma CVD zařízení (převzato z [2], dodatečně pozměněno).	6
Obrázek 2-1 Pásová struktura energetických stavů	10
Obrázek 2-2 P-N přechod	10
Obrázek 2-3 Pásový diagram znázorňující bariéru v polovodiči při nulovém napětí a po přiložení externího napětí v propustném a závěrném směru na p-n přechodu. (převzato z [5], dodatečně upraveno).....	11
Obrázek 2-4 Schématická značka a struktura tranzistoru.	12
Obrázek 2-5 Schématická značka a struktura tranzistoru MOS. (převzato z [8])	13
Obrázek 2-6 Ukázka vnitřního zapojení IGBT tranzistoru.....	14
Obrázek 3-1 Napařovací zařízení CHA MARK 50	15
Obrázek 3-2 Napařovací komora	16
Obrázek 3-3 Planeta z napařovačky naplněna křemíkovými deskami.	16
Obrázek 3-4 znázornění 9 bodů pro měření homogenity a vrstevového odporu 4 bodovou metodou.	17
Obrázek 3-5 Spektrální analýza struktury Al + TiNiAg.	18
Obrázek 3-6 Křemíkový ingot (převzato z [10])	19
Obrázek 3-7 Zpracovaná křemíková deska (převzato z [10]).....	19
Obrázek 4-1 Nařezaná deska pro peeling test.....	22
Obrázek 4-2 Peeling test titanu na křemíku. Naprášená vrstva (levý obrázek), napařená vrstva (pravý obrázek).	23
Obrázek 4-3 Peeling test niklu na křemíku. Naprášená vrstva (levý obrázek), napařená vrstva (pravý obrázek).	23
Obrázek 4-4 Peeling test niklu na hliníku. Naprášená vrstva (levý obrázek), napařená vrstva (pravý obrázek).	24
Obrázek 4-5 Peeling test titanu na hliníku. Naprášená vrstva (levý obrázek), napařená vrstva (pravý obrázek).	24
Obrázek 4-6 VDSON test Al + naprášené vrstvy Ni Ag	25
Obrázek 4-7 VDSON test Al + napařené vrstvy Ni Ag.....	26
Obrázek 4-8 VDSON test AL + naprášené vrstvy Ti Ni Ag	26

Obrázek 4-9 VDSO ^N test naprášené vrstvy Ti Ni Ag.....	27
Obrázek 4-10 VDSO ^N test standartního napařovacího procesu Al + Ti Ni Ag.....	27
Obrázek 4-11 VDSO ^N test napařené vrstvy Ti Ni Ag.	28
Obrázek 4-12 Shrnutí výsledku VDSO ^N testu.	30

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Specifikace použitých prvků pro tenké vrstvy.....	20
Tabulka 2 Naměřené hodnoty vrstevového odporu naměřené pomocí Prometrix VP - 10.	21
Tabulka 3 Hodnoty tloušťky trojvrstvy TiNiAg naměřené pomocí profilometru.	22

ÚVOD

Jednou ze základních vlastností výkonových a spínacích prvků je rychlost sepnutí, rozepnutí a možnost přes takové součástky přenášet velké proudy. Bipolární tranzistory fungují jako dobré výkonové součástky, ale jejich spínací rychlost je nízká oproti tomu vysokou rychlost spínání dosahují unipolární tranzistory například MOSFETy. Unipolární tranzistory zase nevydrží přenos velkých proudů. Z tohoto důvodu se začalo používat tzv. IGBT tranzistorů. IGBT součástka přebírá dobré výkonové vlastnosti bipolárních tranzistorů a rychlost spínání z unipolárních tranzistorů.

IGBT tranzistory na rozdíl od jiných nejčastěji používaných technologií využívají ke své funkci celý průřez křemíkovým substrátem na kterém jsou vytvořeny. Po rychlém sepnutí unipolárního tranzistoru převezme hlavní funkci bipolární, který je vytvořený skrz celou strukturu a je schopný přenést součástkou vysoké proudy. Pro správnou funkci součástky je velmi důležité, aby tloušťka křemíkové desky (substrátu) byla velmi nízká. Pro představu, u technologií pro výrobu čipů, integrovaných obvodů atd. se používá tloušťky přibližně 350 μm , aby mohla IGBT součástka dobře pracovat je broušena na nižší hodnoty okolo 75 μm . Díky nízké tloušťce má součástka mnohem nižší odpor a tím se i méně zahřívá při průchodu vysokých proudů.

Práce se zabývá napařováním a naprašováním tenkých vrstev niklu, stříbra, titanu a hliníku na zadní stranu IGBT součástky. Nadeponované vrstvy musí mít dobrou adhezi k substrátu. Špatně zvolená kombinace vrstev a špatně vytvořený kontakt mezi vrstvou způsobí nárůst odporu a součástka po spuštění se prorazí (shoří).

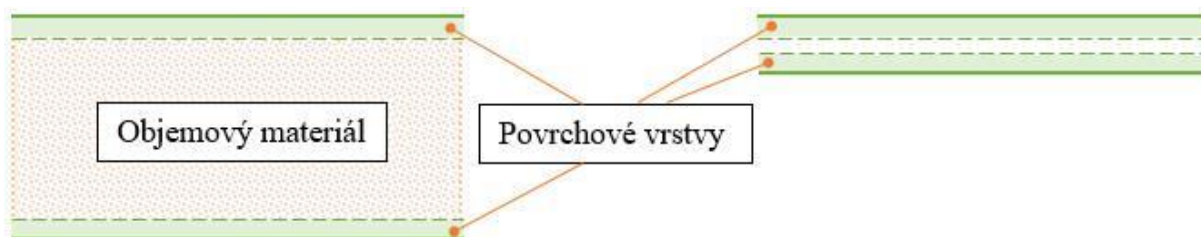
IGBT tranzistory jsou velké součástky které se pohybují svou velikostí okolo 0,5 cm až nad hodnoty 1 cm. Jelikož jsou součástky svou plochou hodně velké je zapotřebí dbát i na co nejpřesnější homogenitu nadeponovaných vrstev.

1 TENKÁ VRSTVA

1.1 Tenká vrstva

Tenká vrstva představuje materiál o velikosti tloušťky od několika desítek nanometrů až po jednotky mikrometrů, který je vytvořen na základním materiálu (substrátu). [2]

Tenké vrstvy mají své specifické vlastnosti, které získají právě díky své tloušťce a významně se liší vlastnostmi od objemového materiálu. Důvod takového chování tenkých vrstev lze z fyzikálního hlediska nejlépe vysvětlit srovnáním objemového a povrchového materiálu. Atomy v objemovém materiálu jsou obklopeny ze všech stran dalšími atomy a díky tomuto složení jsou v silové rovnováze. Naproti tomu, atomy povrchového materiálu v silové rovnováze nejsou, a proto se odlišuje. Tato silová nerovnováha je zapříčiněna nedostatkem atomů ze strany povrchu, a tak na něm vzniká potenciálová bariéra. Takto narušená rovnováha sil sahá až do hloubky desítek až stovek atomových vzdáleností a celou tuhle oblast považujeme za povrch. Pokud budeme zmenšovat tloušťku objemového materiálu tak dlouho, až se povrchové vrstvy budou dotýkat, celý materiál se tak bude chovat jako povrch (viz -1). Tímto chápeme pojem tenká vrstva. [1]



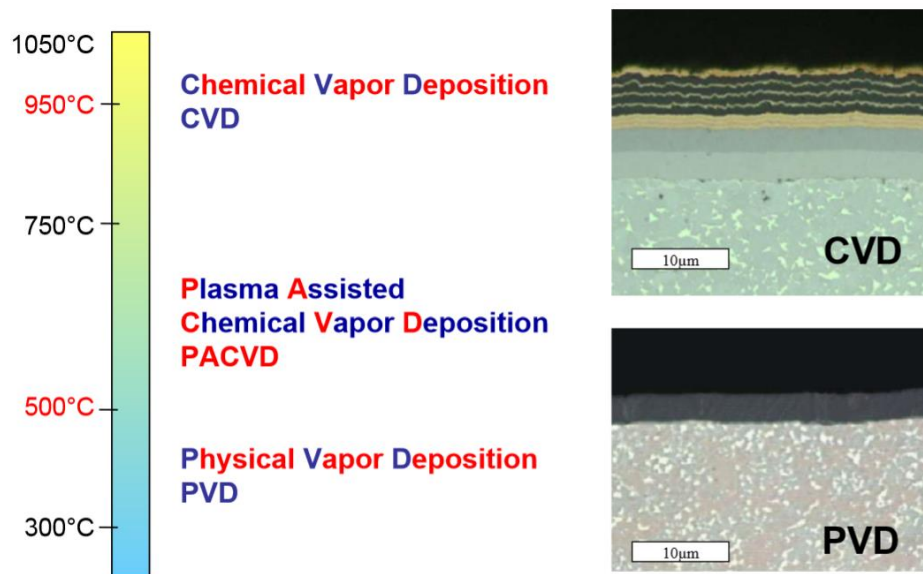
Obrázek 1-1 Ukázka objemového materiálu a povrchové vrstvy (převzato z [1], dodatečně pozměněn).

1.2 Použití tenkých vrstev

Tenké vrstvy mají velký význam v elektronice, kde se používají například pro záznamová digitální média, fotočlánky, monitory, tranzistory, aj. V elektrotechnice se používají jako funkční vrstvy odporů, pro přípravu kontaktů, vodivých propojení i funkčních vrstev integrovaných obvodů. Ve strojírenství se využívají pro zlepšení vlastností, zvyšují například ořezuvzdornost, tvrdost a ochranu proti korozi. Tenké vrstvy se dále používají i v optice jako ochrana proti UV záření, poškrábání nebo jako antireflexivní vrstvy. Navíc je můžeme nalézt i v dekorační technice. [3]

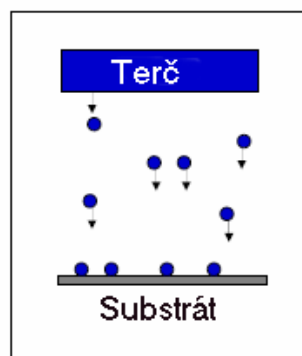
1.3 Vytváření tenkých vrstev

Pro vytváření tenkých vrstev lze užít více metod. Nejčastěji používanými metodami pro depozici jsou CVD (Chemical Vapor Deposition), PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition), PVD (Physical Vapor Deposition). Rozdílem těchto procesů je teplota, za které se vytváří tenká vrstva (viz. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) a také z působ její přípravy. Ten se může uskutečnit z pevného terče u PVD, nebo z plynu u CVD, (viz. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**).

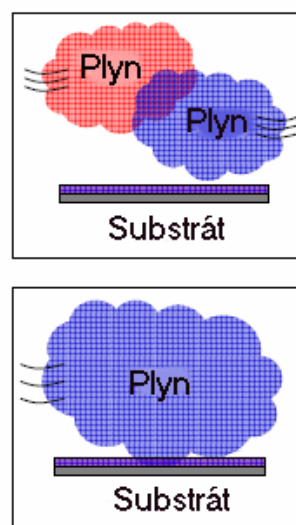


Obrázek 1-2 Základní depoziční procesy (převzato z [2]).

Physical Vapor Deposition (PVD)



Chemical Vapor Deposition (CVD)

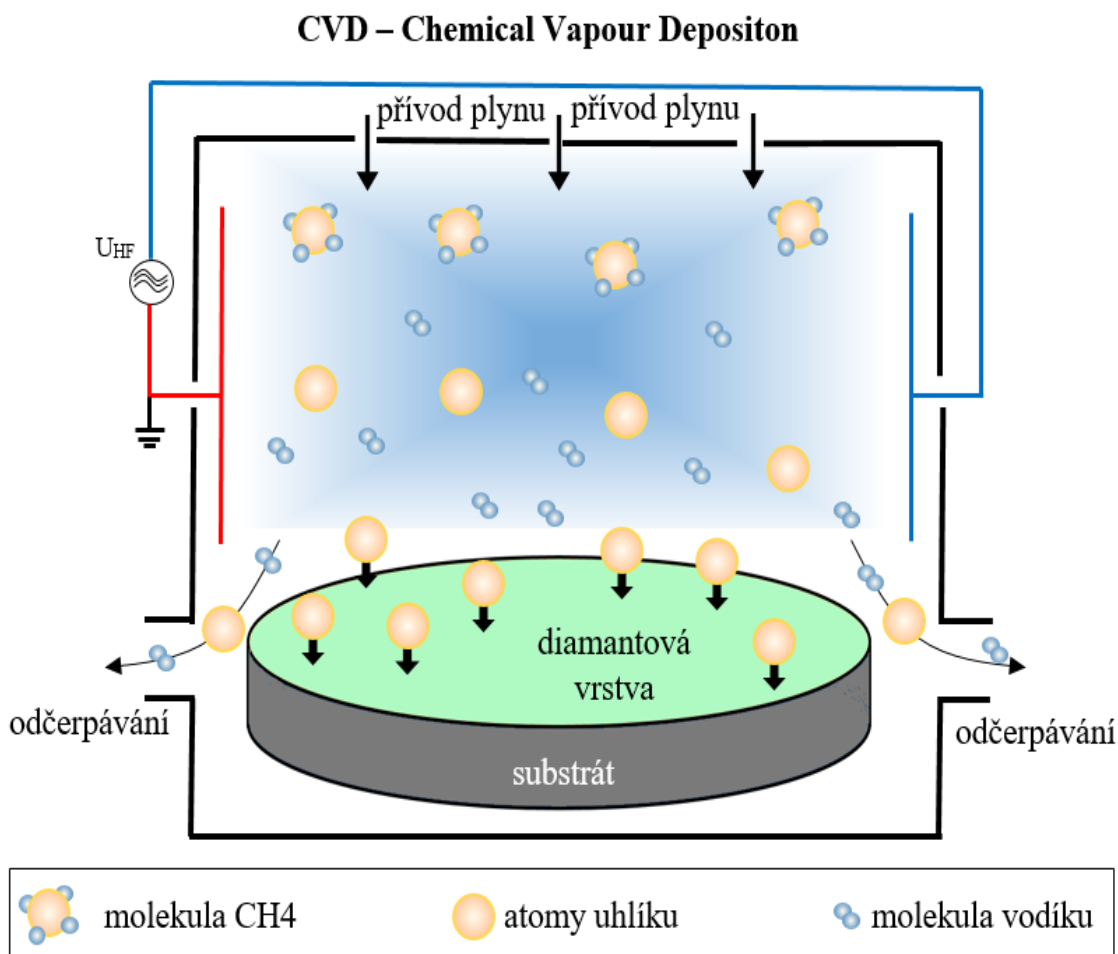


Obrázek 1-3 Příprava vrstvy u PVD a CVD metod (převzato z [2]).

1.3.1 CVD (Chemical Vapor Deposition)

Při CVD technologii se tenká vrstva vytváří díky chemickým procesům, které za vhodných podmínek mění chemické struktury látek. Tyto procesy se odehrávají na rozhraní substrátu a plazmy. Jde o tzv. heterogenní reakce. Do komory jsou připuštěny reakční složky v plynném stavu, které se za vysokých teplot a v objemu plazmy rozkládají, a tak vzniká tenká vrstva na povrchu substrátu. Schéma CVD zařízení je vidět na stránce 2. [2]. [2]

Výhoda depozice pomocí CVD technologie je například vysoká teplotní stabilita vytvořených vrstev, možnost nanášet složité vrstvy, vysoká adheze vrstev a odolnost vůči opotřebení. [2]



Obrázek 1-4 Schéma CVD zařízení (převzato z [2], dodatečně pozměněno).

Nevýhodou používání CVD technologie je hlavně vysoká energetická spotřeba, ekologicky nevyhovující pracovní plynné směsi a tahová pnutí ve vrstvě (rozdílný koeficient tepelné roztažnosti). [2]

1.3.2 PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition)

PACVD metoda vytváří tenkou vrstvu díky elektrickému výboji v plazmatu. Elektrony naráží do molekul plynu, rozdělují je a díky těmto srážkám získají rozdělené molekuly dostatek energie. Při dopadu na substrát pak reagují s molekulami povrchu substrátu. Díky rozdělování molekul plynu pomocí elektrického výboje v plazmatu není potřeba v téhle metodě používat vysokých teplot tak, jako v CVD technologii. [6]

1.3.3 PVD (Physical Vapor Deposition)

PVD metoda je založena na fyzické přeměně pevného terče do plynného stavu. Pro získání plynného stavu se využívá především bombardování požadovaného materiálu ionty (naprašování), nebo zahřívání materiálu do teplot kdy se začne vypařovat (napařování). Takto převedený materiál kondenzuje na substrátu a vzniká tenká vrstva. K použití PVD metody je potřeba vytvořit vysoké vakuum, které se pohybuje od 100 do 10^{-8} Pa. Tlak zde ale závisí také na zvolené technologii. Jelikož při procesu PVD není potřeba vysokých teplot, můžeme nanášet tenké vrstvy z mnoha různých materiálů jako jsou plasty, hliník, ocel aj. [6]

Tato metoda je vůči prostředí ekologicky nejšetrnější, během procesu se nepoužívají žádné nebezpečné plyny ani materiály. Používá se zde pouze inertní plyn, většinou argon, jako ochranná atmosféra, která zabraňuje vzniku oxidů a nitridů. Během PVD procesů nevznikají žádné toxické látky. [2]

Mezi výhody používání metody PVD patří například vysoká odolnost vytvořených tenkých vrstev, nebo snadné vytváření vrstev různých sloučenin speciálně pomocí technologie naprašování (AlCu, AlSi). Takto vytvořené sloučeniny napomáhají elektrickým vlastnostem vrstvy například procento mědi ve vrstvě hliníku pomáhá k omezení elektromigrace. Navíc lze během procesu poměrně přesně měřit tloušťku vytvářené vrstvy, a tím získat přesnou požadovanou tloušťku. [2]

1.4 Podložky (substráty)

Podložka nebo substrát je základní materiál, na který nanášíme tenkou vrstvu. Podle použitého substrátu také musíme zvolit správnou metodu pro nanášení tenké vrstvy. Podle druhu nanášené tenké vrstvy můžeme výrazně změnit vlastnosti celého substrátu. [6]

Pro získání co nejlepší adheze tenké vrstvy k substrátu je třeba substrát před depozicí upravit a očistit. Způsob, jakým budeme upravovat povrch, záleží na vybraném substrátu. Obecně se úprava povrchů dá sepsat ve 3 krocích a to:

1. Úprava řezných hran – pro úpravu řezných hran se používá proud vzduchu, který obsahuje abrazivní částice (přírodní oxidy, kovová abraziva jako jsou např. broky, syntetická abraziva).
2. Chemické čištění substrátu – Tato metoda byla použita i při nanášení tenkých vrstev které jsou předmětem této práce. Čištění před nanášením těchto tenkých vrstev bylo použito 1% kyseliny fluorovodíkové HF, která odstraní

nativní oxid křemíku ze substrátu, čímž se zlepší elektrické vlastnosti kontaktu kov – polovodič.

3. Iontové čištění substrátu – tento způsob čištění probíhá v depoziční komoře. Používá se čištění doutnavým výbojem, kde jako zdroj iontů slouží ionizovaný plyn v komoře, například argon, nebo čištění nízkonapětovým obloukem, kde jako zdroj iontů slouží katodová skvrna. [2]

Nejčastěji používanými substráty jsou:

- sklo – hladký povrch, dostatečně velká mechanická pevnost, chemická odolnost,
- polykrystalická keramika – korundová keramika se vyznačuje dobrou tepelnou odolností, tepelnou vodivostí, a také má dobrou mechanickou pevnost,
- monokrystalické materiály – křemík, germanium,
- organické materiály – jako substrát se používají například termoplastické polymery. [4]

2 POLOVODIČOVÁ TECHNOLOGIE

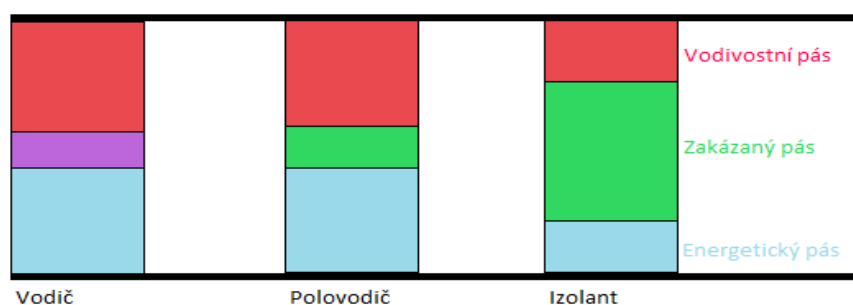
2.1 Historie

Samostatný obor polovodičové techniky se začal rozvíjet intenzivně od roku 1949. Polovodičové prvky díky svým přednostem pronikly do všech oblastí elektrotechniky. Díky svým výhodám (nižší spotřeba, vyšší spolehlivost, odolnost, životnost, menší rozměry) nahradily dříve používané elektronky (v dnešní době jediným druhem elektronek, který se stále používá jsou obrazovky).

2.2 Fyzika polovodičové prvků

Polovodičové prvky, získali své unikátní vlastnosti díky materiálu, ze kterých byli vytvořeny. Rozdíl mezi izolantem, polovodičem a vodičem spočívá na pevnosti vazby mezi valenčními elektrony a jádra atomů. Vodiče mají vazby mezi elektronem a jádrem atomů velmi slabé. Po připojení elektrického napětí k vodiči se volné elektrony mohou snadno pohybovat ve směru elektrického pole. Elektrický odpor vodičů je slabý. U polovodičů a izolantů je vazba valenčních elektronů s jádrem atomů dostatečně silná, že za normálních podmínek se elektrony od jádra neuvolní. To způsobí, že po připojení elektrického napětí nepoteče polovodičem nebo izolantem proud. Abychom dosáhli vodivosti u polovodičových materiálu nebo izolantu je zapotřebí dodat jim energii například zahříváním daného materiálu. Při dodání energie zahříváním se odtrhnou některé valenční elektrony od jádra atomu a zvýší tím vodivost materiálu. Rozdíl mezi polovodičem a izolantem je ve velikosti elektrické vodivosti, která se měří za pokojové teploty. Elektrická vodivost izolantů je asi 10^{15} krát menší než vodivost, kterou získají polovodiče za pokojové teploty.

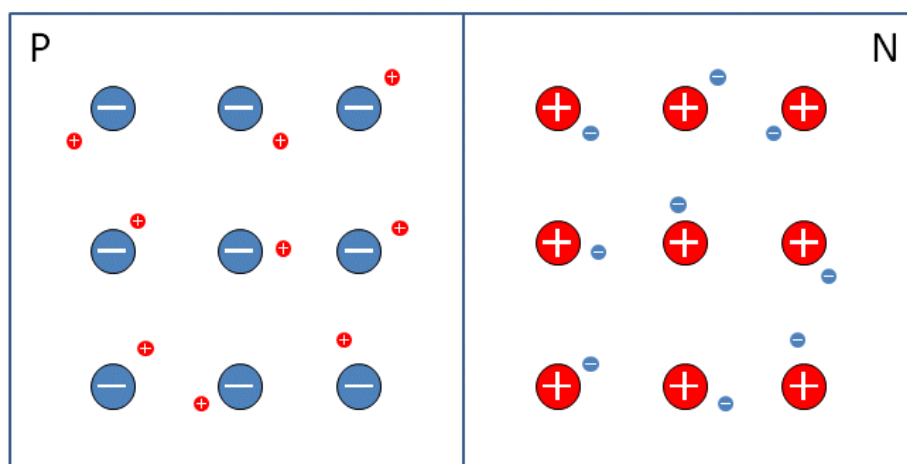
Polovodičových materiálu je velké množství ale nejčastěji se využívá v elektrotechnice germanium a křemík. Atom těchto dvou prvků má čtyři valenční elektrony, kterými se atom váže k dalším atomům. Pokud takovým atomům dodáme dostatečnou energii (například v podobě tepla), dostanou se některé valenční elektrony přes zakázaný pás do vodivostního pásu (Obr.2-1) a vznikne pár – volný elektron a díra. Dírou je nazvaná mezera ve struktuře po uvolněním elektronu. Takto vytvořený pár se může vlivem vnějšího elektrického pole pohybovat a vzniká vodivost nazvaná vlastní vodivost polovodičů.



Obrázek 2-1 Pásová struktura energetických stavů

Dalším typem vodivosti, které je u polovodičů možné dosáhnout je vodivost nevlastní (příměsová). Tento typ vodivosti je možné získat přidáním třímocného nebo pětímocného prvku do struktury čistého křemíku. Při přidání pětímocného prvku, například boru, zůstane jeden přebytečný elektron a vznikne vodivost typu N (negativní). U třímocných prvků, které přidáme do struktury křemíku bude jeden elektron chybět, vznikne „díra“ a tím vznikne vodivost typu P (pozitivní). Tyto volné elektrony nebo díry napomáhají výrazně ke zvýšení vodivosti polovodičového materiálu.

Pokud spojíme polovodič typu N s typem P na mikroskopické úrovni, tak že na sebe jejich krystalové mřížky přímo navazují, vznikne na rozhraní obou polovodičů tzv. přechod P-N. Volné elektrony z polovodiče typu N v blízkosti přechodu přechází do prostoru polovodiče typu P, kde rekombinují s volnými dírami. Kolem přechodu tak vznikne vyprázdněná oblast, kde v polovodiči N zbyly pevné ionty s kladným potenciálem a v polovodiči P pevné ionty se záporným potenciálem. Tyto ionty vytváří difuzní napětí, které odpuzuje zbývající volné elektrony a díry.

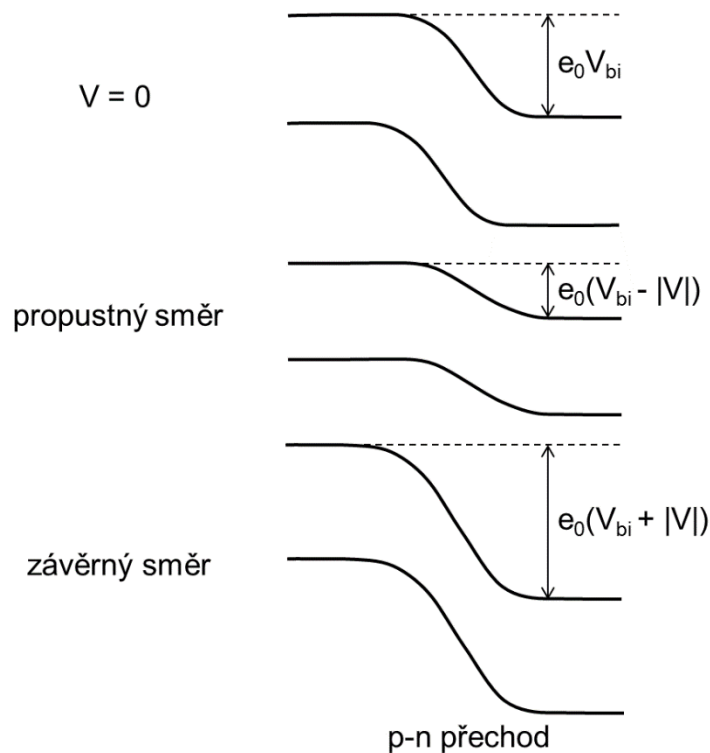


Obrázek 2-2 P-N přechod

2.3 Polovodičové prvky

2.3.1 Dioda

Dioda je polovodičový prvek, který má při jedné (závěrné) polaritě přiloženého napětí významně vyšší hodnotu odporu než při druhé (propustné) polaritě. To umožňuje usměrnění střídavého proudu na stejnosměrný. Příčinou usměrňovacího chování je existence bariery, která části volných nositelů náboje znesnadňuje průchod součástkou. Přiložením externího napětí se závěrnou nebo propustnou polaritou způsobí snížení nebo zvýšení bariery (Obr.2-3), která tak sníží nebo zvýší proud nositelů z oblasti, kde jsou většinovými (majoritními) nositeli, do druhé části diody. [5]



Obrázek 2-3 Pásový diagram znázorňující bariery v polovodiči při nulovém napětí a po přiložení externího napětí v propustném a závěrném směru na p-n přechodu. (převzato z [5], dodatečně upraveno)

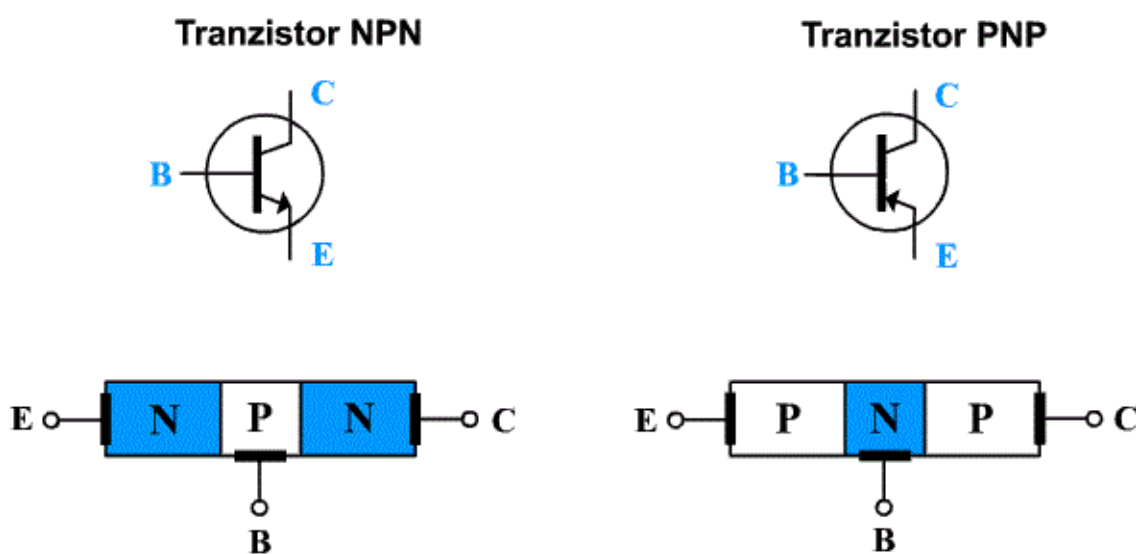
Diody můžeme rozdělit do několika skupit podle jejich použití:

- Usměrňovací diody
- Zenerovy diody
- Tunelové diody
- Schottkyho diody
- Variapy

2.3.2 Bipolární tranzistor

Bipolární tranzistor je polovodičová součástka, která se skládá ze dvou p-n přechodů. Teoreticky se jedná o dvě diody, kde je jedna zapojená v propustném směru a druhá v závěrném směru. V praxi nelze sestavit tranzistor pomocí dvou diod, jelikož se využívá mikroskopického spojení krystalových mřížek N-P a P-N přechodu.

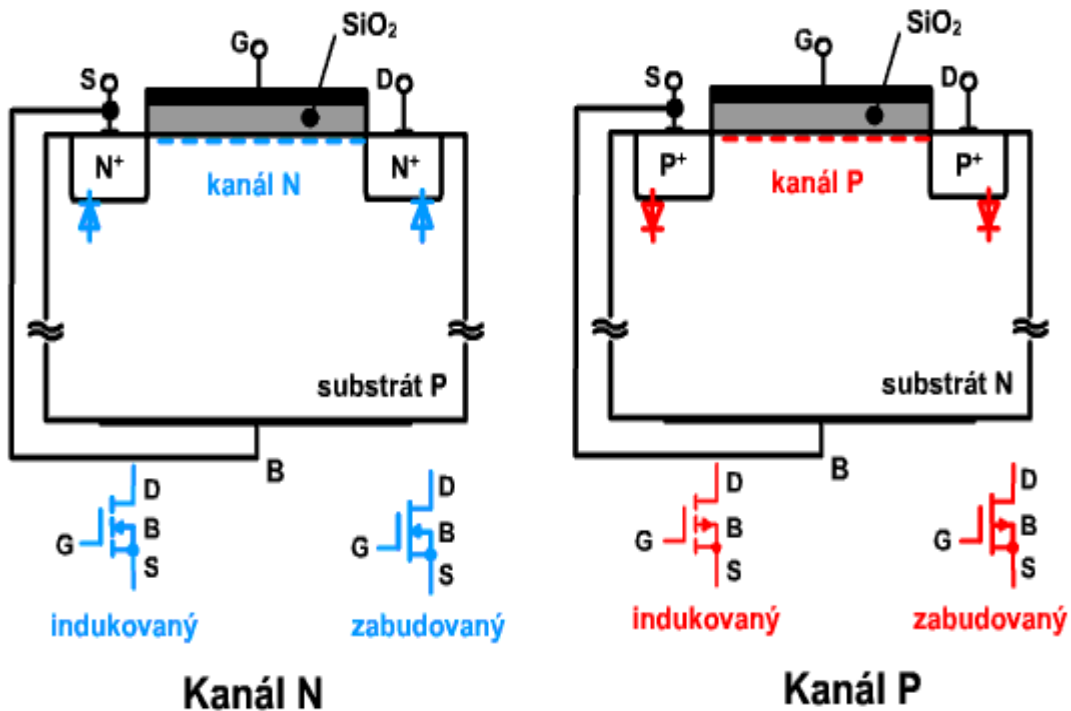
U tranzistorové součástky se využívá uspořádání vodivostních typů buď NPN nebo PNP. (Obr 7) Prostřední vrstva se nazývá báze (B), krajní emitor (E) a kolektor (C). Pokud je střední část součástky (báze) dostatečně tenká, značná část minoritních nositelů, které do ní přešly z emitoru přes propustně polarizovaný P-N přechod, může projít celou bází, aniž by zrekombinovala, až k závěrně polarizovanému P-N přechodu. Ten nepředstavuje pro minoritní nosiče žádnou bariéru a nositele mohou přejít do kolektoru.



Obrázek 2-4 Schématická značka a struktura tranzistoru.

2.3.3 MOS tranzistory

Struktura tranzistoru MOS je založena na kovu a polovodiče oddělených oxidovou vrstvou (Metal-Oxide-Semiconductor). Kovová elektroda bývá označována jako hradlo (gate). Polovodič obsahuje navíc dvě elektrody s opačnou vodivostí než jeho objem. Oblast source a oblast drain jsou vůči objemu na stejném potenciálu nebo jsou polarizovány záporně. Pokud je na jednu z těchto oblastí přiloženo vnější napětí o vyšší polaritě než na druhé oblasti (v závěrném směru vůči objemu polovodiče), nemůže mezi nimi v ideálním případě protékat elektrický proud majoritních nositelů. Pokud se ale pomocí napětí přiloženého na hradlo vytvoří při rozhraní polovodiče s oxidem inverzní vrstva, obě oblasti (source a drain) budou propojeny vrstvou polovodiče se stejným typem vodivosti. [5]



Obrázek 2-5 Schématická značka a struktura tranzistoru MOS. (převzato z [8])

Maximální napětí V_{Gmax} , které lze na hradlo (gate) připojit je dáno elektrickou pevností oxidu. Obvykle se hodnota pohybuje okolo 10 MV/cm, ale k defektům oxidu nebo na jeho rozhraní může docházet už při mnohem nižších intenzitách elektrického pole.

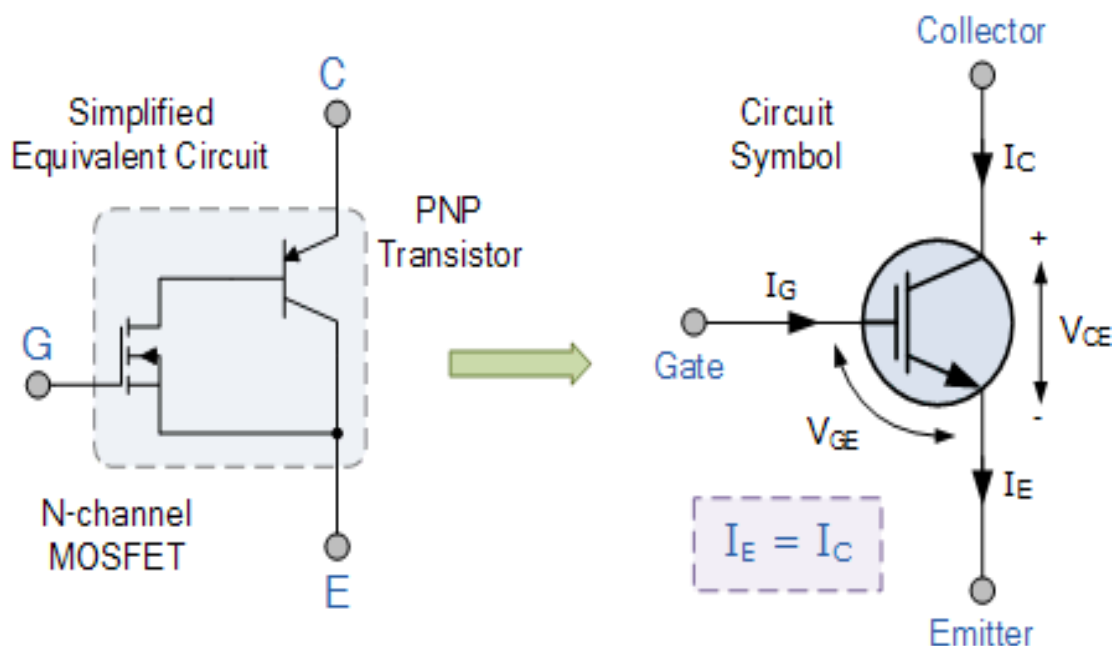
2.3.4 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) tranzistor

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) je součástka která využívá vlastností jak bipolárního tranzistoru, tak unipolárního tranzistoru, který představuje ideální spínací zařízení.

IGBT tranzistor přebírá ty nejlepší vlastnosti těchto dvou tranzistoru, vysokou vstupní impedanci a vysoké spínací rychlosti MOSFET s nízkým saturačním napětím bipolárního tranzistoru a kombinuje je za účelem vytvoření jiného typu tranzistorového spínacího zařízení, které je schopné pracovat s velkými proudy.

Výsledkem této hybridní kombinace je, že tranzistor IGBT má výstupní spínací a vodivé charakteristiky bipolárního tranzistoru, ale je řízen jako MOSFET

IGBT se používají hlavně v aplikacích výkonové elektroniky, jako jsou střídače měniče a napájecí zdroje. Vysokoproudové a vysokonapěťové bipolární tranzistor jsou dostupné, ale jejich spínací rychlosti jsou pomalé, zatímco výkonové MOSFETy mohou mít vyšší spínací rychlosti, ale jejich vysokoproudové vlastnosti jsou těžko dosažitelné a jsou drahé.



Obrázek 2-6 Ukázka vnitřního zapojení IGBT tranzistoru

2.3.5 zadní strana pro součástky IGBT

Procesory, integrované obvody a součástky vytvářené na jednom čipu jsou tvořeny planární technologií především na jedné straně křemíkové desky. Zbytek objemu křemíkové desky slouží jako nosný materiál pro daný obvod. U IGBT součástky je aktivní i zadní strana křemíkové desky.

Proud procházející součástkou IGBT prochází celou křemíkovou deskou. Jelikož je zadní strana aktivní a má na funkci součástky zásadní vliv je zapotřebí oproti integrovaným obvodům, procesorům a dalším součástkám dbát na úpravu zadní strany.

Úprava probíhá už od nařezání křemíkové ingotu, kdy hned po nařezání je zapotřebí zbrousit desku na požadovanou tloušťku následně jí vyleštit, aby bylo dosaženo co největší homogenity. Zadní strana nesmí obsahovat žádné nečistoty a ani poruchy materiálu jako jsou (prachové částice a škrábance). Poškozené desky se vyřazují a nepokračují v procesu. Aby se zabránilo prachovým částicím celá výroba probíhá v čistých prostorech. Před depozicí tenkých vrstev na zadní stranu se deska znovu brousí a leptá na požadovanou finální tloušťku.

3 MATERIÁLY, METODY A POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ

3.1 CHA MARK 50

Pro napařování trojvrstvy Ti-Ni-Ag a vrstvy Al, byla použita napařovačka od firmy CHA industries (Obr. 3-1). Napařovací zařízení se skládá kromě vlastní komory (Obr. 3-2) taky z několika dalších částí složených do ovládacího panelu. Jsou to indikátor tlaku, ovládací panel InfCon IC6 na kontrolu depozičního procesu, kontrolní panel dodávky vysokého napětí CHA SR-10D, ovládací panel elektronového paprsku Telemark model 880 a PC Siemens s dotykovým monitorem obsahující software CHA.



Obrázek 3-1 Napařovací zařízení CHA MARK 50



Obrázek 3-2 Napařovací komora



Obrázek 3-3 Planeta z napařovačky naplněna křemíkovými deskami.

Při napařování je velmi důležité, aby tlak v komoře byl co nejnižší toho se dosahuje pomocí odsávacího systému loženého ze 4 pump. Ze začátku procesu, kdy je komora zavzdušněna atmosférickým tlakem se používá rotační pumpa po ní následuje rootsova pumpa, turbomolekulární pumpa a na závěr, aby se dosáhlo co nejnižších tlaku a největší čistoty komory se používá kryosorpční vývěva

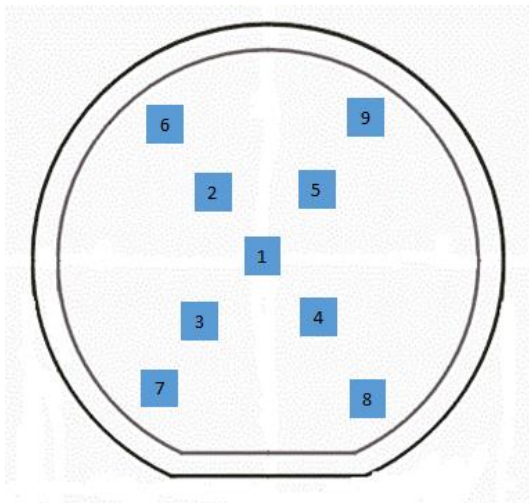
3.2 Balzers LLS – 801

LLS – 801 je napařovací zařízení od firmy Balzers. Napařovačka byla využita pro deponování vrstev TiNiAg, které se srovnávali s vlastnostmi tenkých vrstev napařených.

Zařízení je založeno na magnetronovém způsobu naprašování popsáno v předchozích kapitolách.

3.3 Měření tloušťky

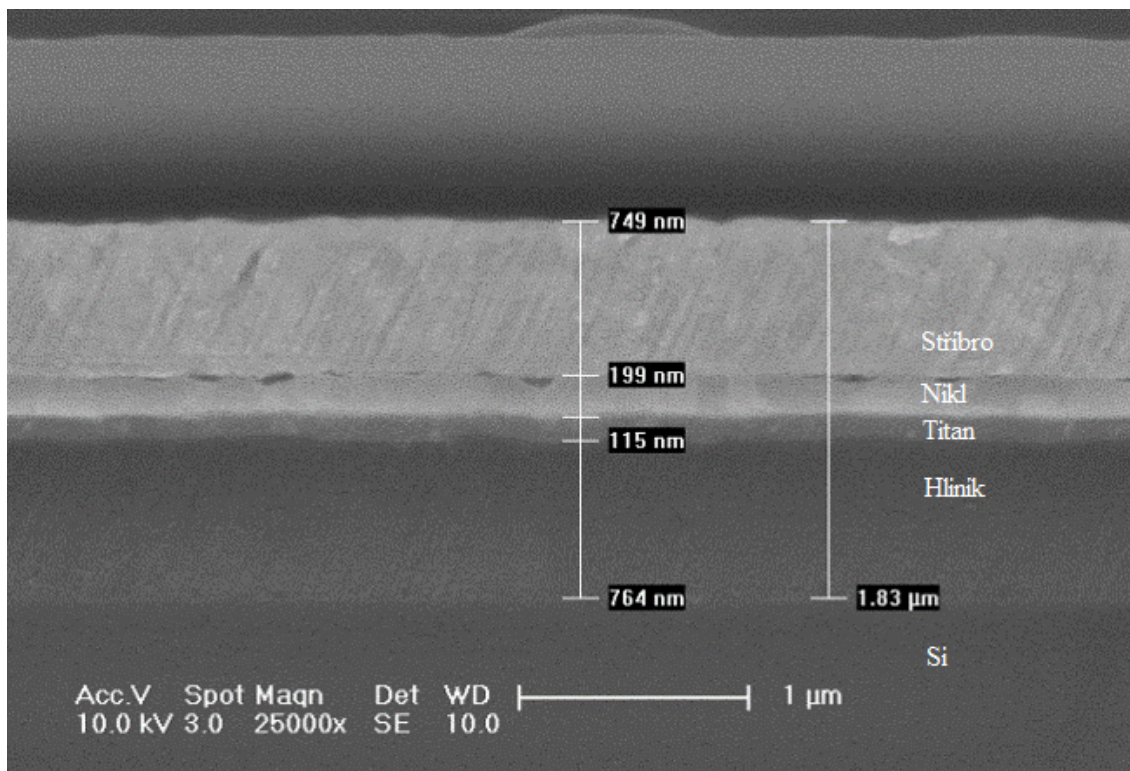
Pro měření individuálních kovových vrstev se používá prometrix VP - 10, který slouží pro měření vrstevového odporu tzv. 4 bodovou metodou. Metoda je použita na 9 měřících místech na Si desce (Obr.3-4) pro zjištění homogenity vytvořené vrstvy.



Obrázek 3-4 znázornění 9 bodů pro měření homogenity a vrstevového odporu 4 bodovou metodou.

Měření celkové tloušťky trojvrstvy se používá profilometr v tomto případě byl použitý prometrix VP - 11. Profilometr je dotyková metoda, kdy tenká vrstva musí na podložce tvořit schod. Výška schodu se měří diamantovým hrotem, který se pohybuje přes tento schod.

Tyto dvě metody slouží pro ověření tloušťky jednotlivých materiálů po každé deponované várce. Pro přesné ověření tloušťky a struktury jednotlivých vrstev se používá spektrální elektronový mikroskop (SEM). (Obr. 3-5)



Obrázek 3-5 Spektrální analýza struktury Al + TiNiAg.

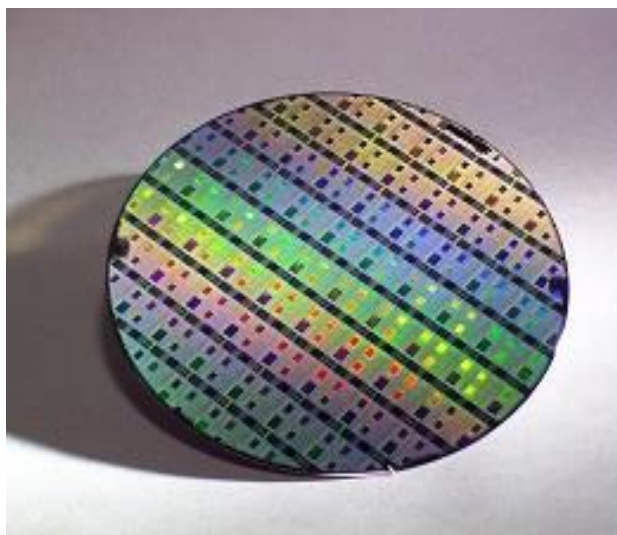
3.3.1 Křemíková deska (wafer)

Wafer je křemíková deska vytvořený z polovodiče a používaný jako substrát na kterém se vytvářejí mikroobvody a součástky.

Výroba křemíkového desky začíná vytvořením křemíkového ingotu (Obr. 3-6) monokrystalu czochralskiho metodou, kde se musí udržovat homogenní prostředí při celém procesu výroby. Jakékoliv odchylky od procesních hodnot jako například teplota taveniny, teplota při tuhnutí a rychlost tažení způsobí v křemíkovém ingotu nežádoucí poruchy.



Obrázek 3-6 Křemíkový ingot (převzato z [10])



Obrázek 3-7 Zpracovaná křemíková deska (převzato z [10])

Ingot se nařeže na jednotlivé desky, jejich tloušťka po řezání se určuje podle velikosti průměru křemíkové desky. V dnešní době se nejvíce používá průměr 6 palců. Tloušťka takové desky je po řezání většinou 725 μm . Tloušťka se během procesu značně sníží broušením na požadovanou velikost. Řezáním se také určuje orientace krystalografické mřížky. Nejčastěji používané krystalografické orientace jsou 100 a 111.

3.3.2 Hliník, Titan, Nikl a stříbro

U prvku používaných pro napařování a naprašování při tvorbě polovodičových součástek. Je důležité, aby použité prvky byly co nejčistší. Dodávají se v malých válcovitých tvarech.

Tabulka 1 Specifikace použitých prvků pro tenké vrstvy

	Hliník	Titan	Nikl	Stříbro
Čistota [%]	99,999	99,99	99,97	99,99
Průměr válce [mm]	6,35	6,35	6,35	6,35
Délka válce [mm]	19,05	9,54	12,7	6,35

4 TESTY ZPRACOVANÝCH DESEK

4.1 Testování tloušťky

Pro hliník byla použita odporová metoda. Na zařízení prometrix VP -10. Z naměřených hodnot lze pomocí vztahu (5.1) vypočítat tloušťku vrstvy.

$$Th \text{ (tloušťka)} = \frac{\rho \text{ (měrný odpor)} [\mu\Omega\text{cm}]}{R \text{ (vrstvý odpor)} [m\Omega/\square]} \quad (5,1)$$

Příklad výpočtu tloušťky vrstvy z průměrné hodnoty vrstvého odporu:

$$Th = \frac{\rho}{R} = \frac{28}{33,44} = 0,837 \mu\text{m}$$

Tabulka 2 Naměřené hodnoty vrstvého odporu naměřené pomocí Prometrix VP - 10.

Měřicí bod na Si desce		Měrný odpor ρ Al	Vrstvý odpor	Tloušťka
		($\mu\Omega\text{cm}/10$)	($m\Omega/\square$)	(μm)
1	Střed	28	32,85	0,852
2	Vlevo-nahoře1	28	32,99	0,849
3	Vlevo-dole1	28	33,24	0,842
4	Vpravo-dole1	28	33,28	0,841
5	Vpravo-nahoře1	28	33,09	0,846
6	Vlevo-nahoře2	28	33,71	0,831
7	Vlevo-dole2	28	33,97	0,824
8	Vpravo-dole2	28	34,1	0,821
9	Vpravo-nahoře2	28	33,77	0,829
	Průměr	28	33,44	0,837
	SD		0,43	0,011
	SD (%)		1,28	1,273

Měření pomocí profilometru jsme použili pro měření tloušťky trojvrstvy TiNiAg. Měření jsme provedli na 3 deskách ze sady. Tab. 3 zobrazuje naměřené hodnoty. Metoda je vysvětlena v kapitole (4.3).

Tabulka 3 Hodnoty tloušťky trojvrstvy TiNiAg naměřené pomocí profilometru.

	TiNiAg		
wfr.	1	2	3
	Th (tloušťka) [μm]	Th (tloušťka) [μm]	Th (tloušťka) [μm]
	0,9554	0,9612	1,0620
	0,9703	1,0490	1,0750
	1,0850	1,0900	1,0720
Průměr	1,0036	1,0334	1,0697

4.2 Peeling test

Adheze tenkých vrstev se testuje tzv. peeling testem. Do nadeponované tenké vrstvy se na testovací desce vyřežou drážky (Obr. 4-1). Na nařezanou desku se nalepí páska a testuje se strhnutím pásky. Testovaná deska je po testu zničená a vizuálně se sleduje, jestli vytvořená tenká vrstva vydržela nebo se začala odlupovat.



Obrázek 4-1 Nařezaná deska pro peeling test

Peeling test byl prováděn na napařených a naprášených deskách v kombinaci.

- Adheze Ti na Si
- Adheze Ni na Si
- Adheze Ni na Al
- Adheze Ti na Al

Na (Obr. 4-2 až 4-5) jsou výsledky jednotlivých peeling testů.



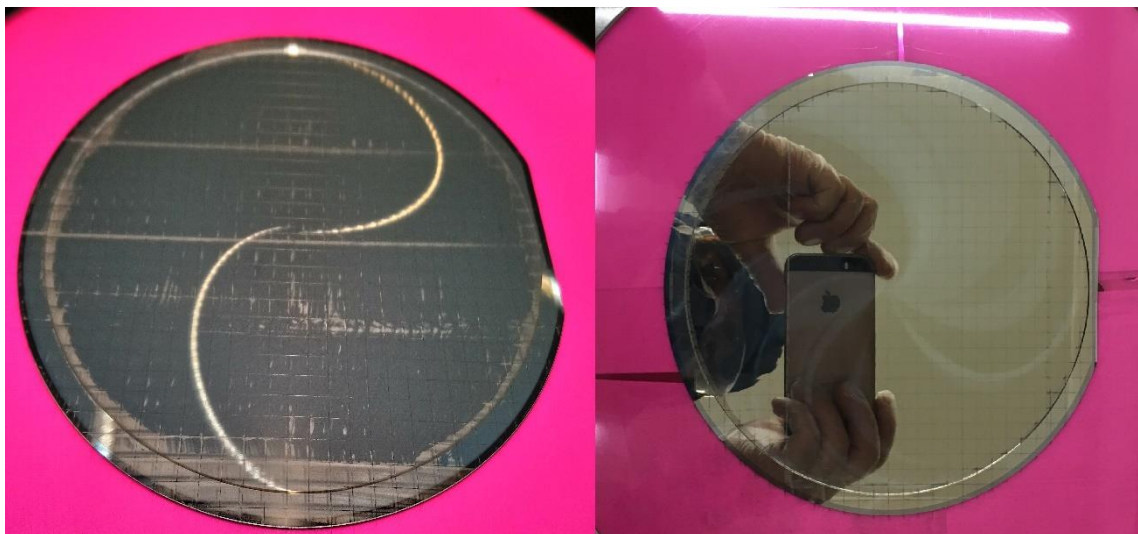
Obrázek 4-2 Peeling test titanu na křemíku. Naprášená vrstva (levý obrázek), napařená vrstva (pravý obrázek).

Naprášená i napařená vrstva titanu na křemíku vydržela bez problému. Na fotkách nejsou vidět žádné defekty odloupenutí.

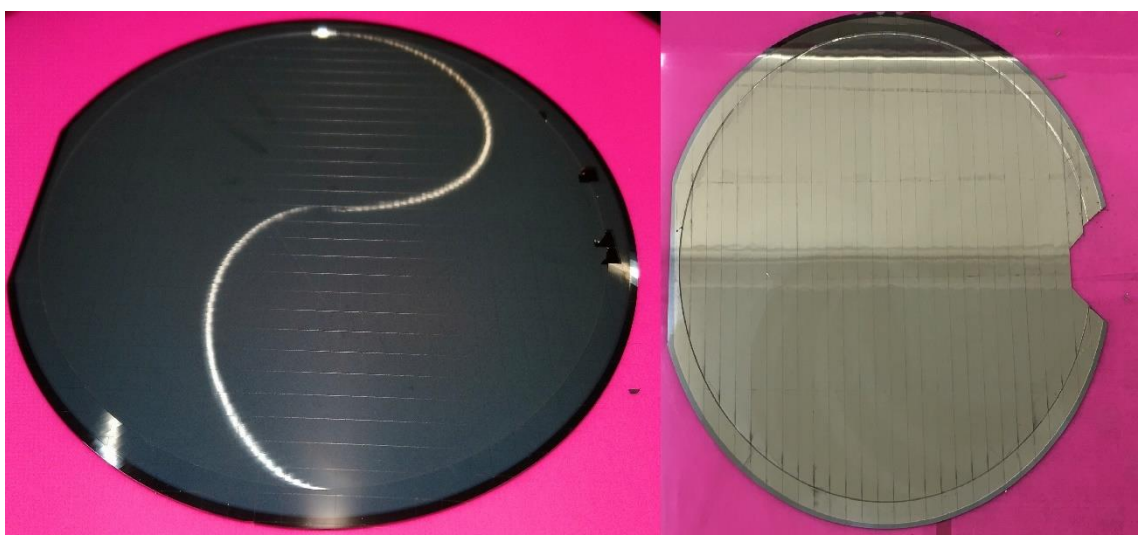


Obrázek 4-3 Peeling test niklu na křemíku. Naprášená vrstva (levý obrázek), napařená vrstva (pravý obrázek).

Oproti předchozímu testu jsou zde vidět obrovské chyby v adhezi niklu na křemík.



Obrázek 4-4 Peeling test niklu na hliníku. Naprášená vrstva (levý obrázek), napařená vrstva (pravý obrázek).



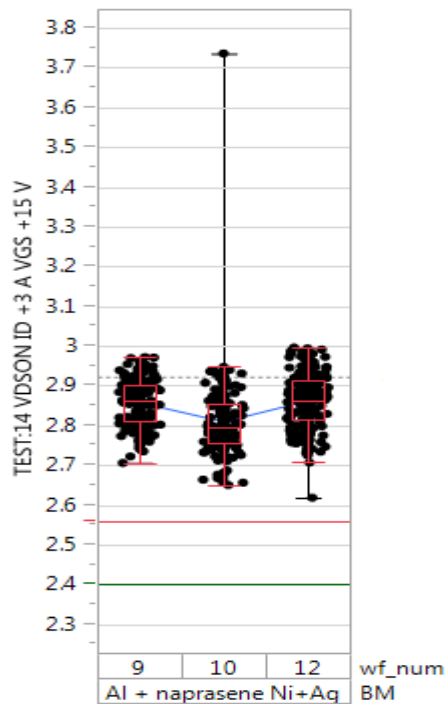
Obrázek 4-5 Peeling test titanu na hliníku. Naprášená vrstva (levý obrázek), napařená vrstva (pravý obrázek).

Ze všech předchozích testů titan na hliníku má nejlepší adhezi.

4.3 Test VDSO

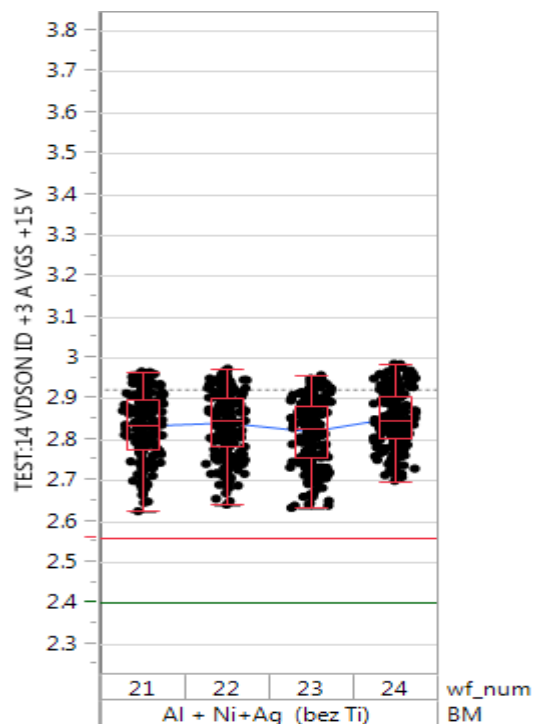
Pro test VDSO byla sada 25 křemíkových desek rozdělena do 6 skupin. Zadní strana každé skupiny byla připravena jinak. VDSO sleduje jaký má vliv struktura naprášené/napařené vrstvy na správný ohmický kontakt při konstantním napětí mezi gate a source a proud drainem. $U_{GS} = +15 \text{ V}$ a proud $I_D = +3 \text{ A}$. Výsledky by se měli pohybovat kolem 3 V, aby byl zajištěn dobrý ohmický kontakt. Sada desek byla rozdělena následovně:

- Křemíkové desky 9,10,11,12 Al + naprášená NiAg (Obr. 4-6)
- Křemíkové desky 21,22,23,24 Al + napařená NiAg (Obr. 4-7)
- Křemíkové desky 8,13,14,15 Al + naprášená TiNiAg (Obr. 4-8)
- Křemíkové desky 3,5,6,7 naprášená TiNiAg (Obr. 4-9)
- Křemíkové desky 16,17,18,19,20 POR (standartní napařovací proces)
Al + TiNiAg (Obr. 4-10)
- Křemíkové desky 1,2,4,25 napařená TiNiAg (Obr. 4-11)



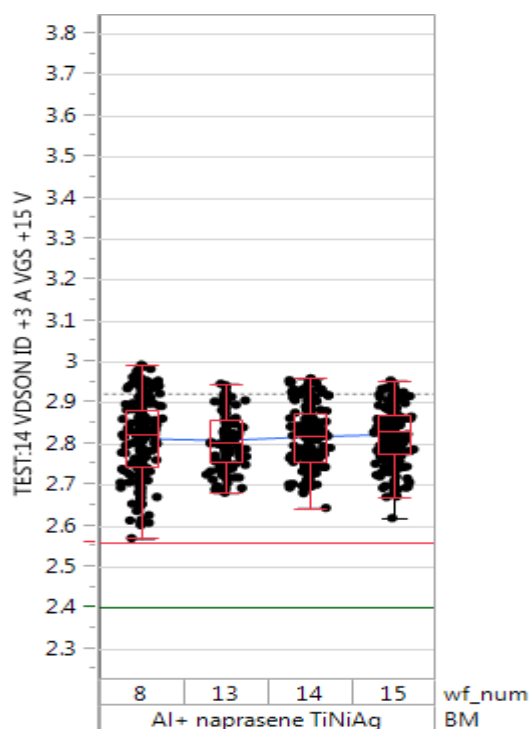
Obrázek 4-6 VDS ON test Al + naprášené vrstvy Ni Ag

Deska číslo 11 se během testu zničila. Hodnoty se pohybují kolem požadované hodnoty 3 V. Hliník tvoří dobrý kontakt s niklem.

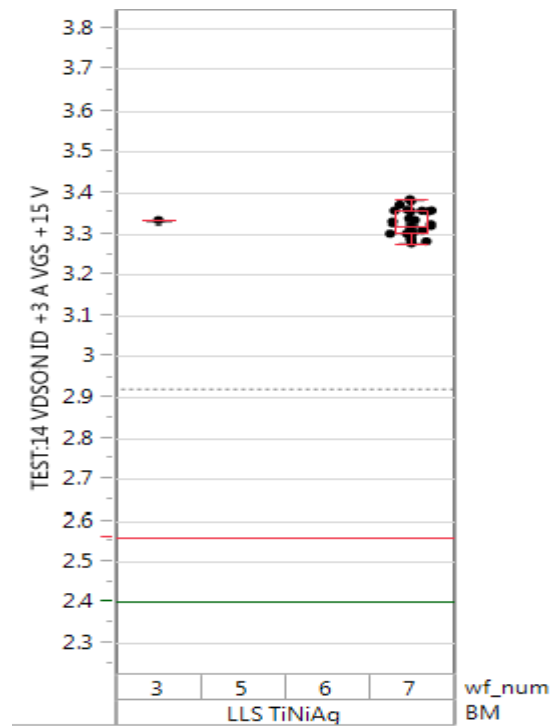


Obrázek 4-7 VDSO test Al + napařené vrstvy Ni Ag

Podobně jak na předchozím testu, pokud je nanesen hliník, na který se nanáší NiAg at' už napařováním nebo napařováním nemá to na výsledné parametry téměř žádný negativní vliv. Podobně i na následujícím obrázku kde hliník tvoří kontakt s titanem.

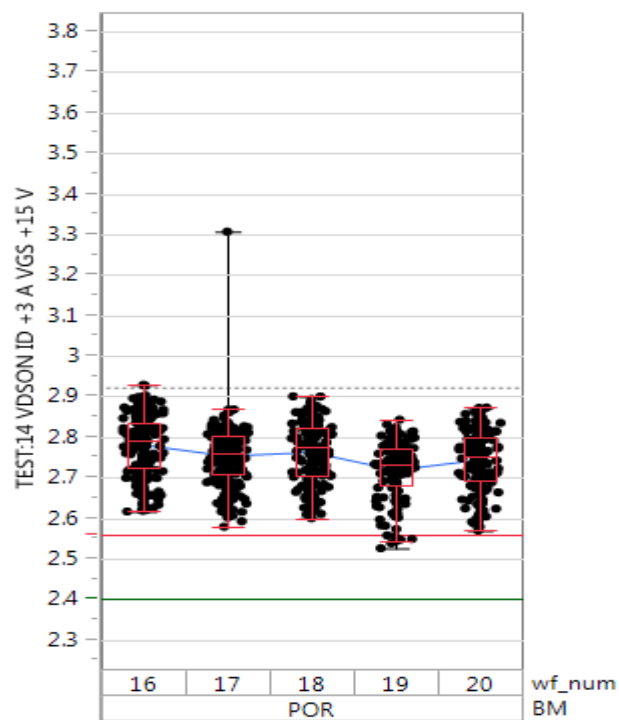


Obrázek 4-8 VDSO test AL + napařené vrstvy Ti Ni Ag

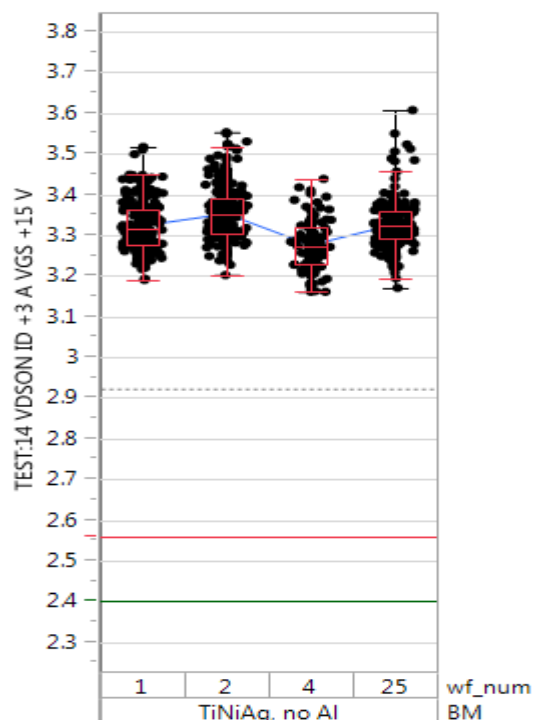


Obrázek 4-9 VDSO test naprášené vrstvy Ti Ni Ag

U testu, kde se použilo naprašování pro trojvrstvu TiNiAg bez přítomnosti hliníkové vrstvy, kontakt mezi Ti a Si pro IGBT technologii není dostatečný hodnoty vystoupaly až mimo rozsah.



Obrázek 4-10 VDSO test standardního napařovacího procesu Al + Ti Ni Ag



Obrázek 4-11 VDSO test napařené vrstvy Ti Ni Ag.

Pro test napařené trojvrstvy Ti Ni Ag se průměr hodnot dostal nad požadovanou hodnotu 3 V. Podobně jak u napařené trojvrstvy ale průměr hodnot se nedostal do takových extrémů, jak tomu bylo u napařování. Příčinou tohoto jevu je v použité technologii. U napařování se titanový target bombarduje ionty argonu, které mají vysokou energii. Tuhle energii předají vyraženým atomům titanu, které s vysokou energií dopadají na substrát a tím povrch naruší. Na narušeném povrchu není možné vytvořit potom dobrý kontakt. U napařování se titan vypaří do prostoru napařovací komory a při kondenzaci na substrát nemá takovou energii, aby narušil povrch substrátu. Po napařování bez použití hliníku vzniká mezi Si a Ti lepší spoj, než kdyby se použila napařovačka.

ZÁVĚR

První část této bakalářské práce byla spojena se všeobecnou problematikou nanášení tenkých vrstev metodami napařování a naprašování. Přípravou substrátu a jeho čištění před deponováním tenkých vrstev. Práce byla zaměřena na vlastnosti těchto tenkých vrstev v polovodičové technologii. Experimenty se prováděly na strukturách IGBT.

Pro měření tloušťky a homogenity nadeponovaných tenkých vrstev bylo použito hned několika metod měření. Pro měření tloušťky trojvrstvy TiNiAg se využilo měření pomocí profilometru. Test byl proveden na 3 deskách. Průměrné hodnoty tloušťky trojvrstvy TiNiAg profilometrem se pohybovali kolem hodnoty 1,036 μm . Pro měření napařené tloušťky hliníku byla použita 4 bodová metoda měření vrstvého odporu a následně byla přepočítána na tloušťku, která vyšla 0,837 μm . Metoda měří křemíkovou desku v 9 měřících místech pro zjištění homogenity této deponované vrstvy. Naměřená směrodatná odchylka (homogenita) vyšla 1,28 %. Měřená deska nepřesáhla tolerance dané pro procesní desky. Pro přesné ověření tloušťky a výsledné struktury vrstvy Al + TiNiAg byl použit spektrální elektronový mikroskop (SEM).

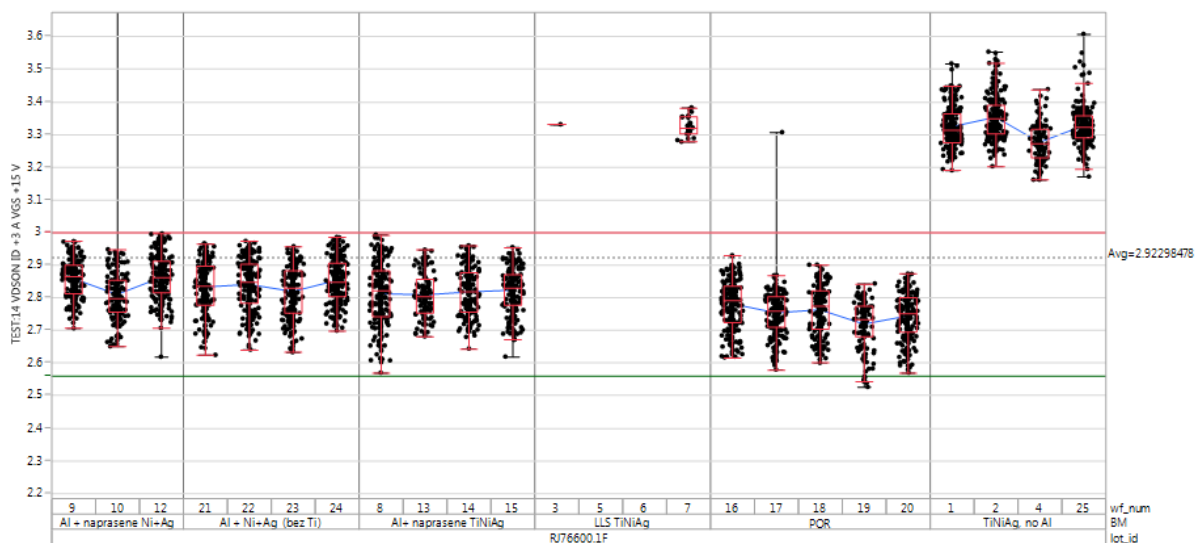
Dalším důležitým parametrem, kterým se bakalářská práce zabývala je adheze jednotlivých vrstev na křemík. Adheze se testovala tzv. peeling testem. Test se prováděl na 4 variantách vzorků. Pro přípravu vzorku bylo použito jak napařování, tak naprašování. První použitou variantou bylo testování adheze mezi křemíkovým substrátem a titanem. Výsledek testu prokázal, že titan má na křemíku dobré adhezí vlastnosti. Druhá varianta byl test adheze mezi křemíkovým substrátem a Niklem naneseným na desku napařováním. U tohoto vzorku byla adheze natolik slabá že se napařený nikl téměř celý strhl. Lepších výsledků bylo dosaženo naprašováním niklu na křemík. Toto prokazuje pozitivní vliv vyšší energie dopadajících odprášených částic z niklového targetu metodou naprašování. Urychlené ionty odprašující target předávají energii niklovým atomům a tato předaná energie způsobila že se částice do povrchu křemíku lépe zabudovaly, než je tomu u napařování. Zbylé dvě varianty, kde se testovala adheze niklu na hliníku a titanu na hliníku, prokázaly že hliník má skvělé adhezí vlastnosti jak na podkladový křemík, tak k obou těmto kovům. Oba tyto testy vyšly dobře.

Bakalářská práce byla z velké části zaměřená na technologii přípravy zadní strany křemíkové desky při výrobě IGBT tranzistorů. U této technologie je na zadní straně nejen důležitá adheze jednotlivých vrstev, ale také ohmické spojení jednotlivých vrstev. Tyto vlastnosti byli vyhodnoceny pomocí VDSO testu, kdy se přes IGBT součástku pustí konstantní proud a sleduje se napětí mezi drain a source. Pokud se napětí vychýlí od vypočítané a očekávané hodnoty okolo 3 V tak nastal problém ve spojení mezi vrstvami a odpor součástky vzrostl. Tento test byl proveden na sadě křemíkových desek s IGBT strukturou, která byla rozdělena do 6 skupin. A to:

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| • Křemíkové desky 9,10,11,12 | Al + naprašovaná NiAg |
| • Křemíkové desky 21,22,23,24 | Al + napařovaná NiAg |
| • Křemíkové desky 8,13,14,15 | Al + naprašovaná TiNiAg |
| • Křemíkové desky 3,5,6,7 | naprašovaná TiNiAg |
| • Křemíkové desky 16,17,18,19,20 | POR (standartní napařovací proces) |
| Al + TiNiAg | |

- Křemíkové desky 1,2,4,25 napařená TiNiAg

První tři skupiny vzorků prokázaly důležitost hliníku naneseného přímo na křemík což se využívá také u skupiny POR (standartní výrobní napařovací proces) a dosáhli dobrých spojení nanesených tenkých vrstev. Hodnoty napětí V_{DS} se pohyboval v požadované oblasti 3 V. U testování trojvrstvy TiNiAg napařováním i naprašováním přímo na křemík došlo k výrazným skokům. Zde obráceně jak u testu adheze dosáhla lepších vlastností napařená vrstva. Důvod je dost podobný, jak byl popsán u testu adheze. Napařená vrstva kondenzovala na substrát s malou energií. Díky tomu narušila strukturu křemíkového substrátu mnohem méně, než tomu bylo u naprašované trojvrstvy. Vysoká energie dopadajících částic nanesená naprašováním narušila povrch substrátu a na narušeném povrchu už nedokázala vytvořit dobrý ohmický spoj a tím zhoršila rezistivitu celé struktury. Shrnutí VDSO testu lze vidět na obrázku. (Obr. 4-12)



Obrázek 4-12 Shrnutí výsledku VDSO testu.

Výsledky adhezního a elektrického testu prokázali, že hliník je velmi důležitý pro vytvoření spolehlivého kontaktu u technologie IGBT.

LITERATURA

- [1] BOK, Karel. *PVD TECHNOLOGIE TENKÝCH VRSTEV V PRŮMYSLOVÉ PRAXI*. Rožnov pod Radhoštěm, 2006.
- [2] Tenké vrstvy. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf.
- [3] EKRT, Ondřej. *Technologie a vlastnosti tenkých vrstev, tenkovrstvé senzory* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická [cit. 2016-11-23]. Dostupné z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/05_TechnologieCVD_+PVD_PECVD_MOVPE_MBE.pdf
- [4] YAHYA, DOAA. *MECHANICKÉ A ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI TENKÝCH KOVOVÝCH VRSTEV NANÁŠENÝCH VAKUOVÝM NAPAŘOVÁNÍM* [online]. Brno, 2015[cit. 2016-11-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=111765
- [5] PÁNEK, Petr, Milan LÍBEZNÝ, Michal LORENC, et al. *ZÁKLADY TECHNOLOGIE VÝROBY POLOVODIČŮ*. 1. Brno: cerm, 2016. ISBN 978-80-7204-939-4.
- [6] GÜNZEL, Martin. *Metody depozice tenkých vrstev pomocí nízkoteplotního plazmatu*. České Budějovice, 2013. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.
- [7] *Zaměření výzkumu a vývoje, přístrojové vybavení, nabídka služeb* [online]. In: . Brno, 2013 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.cvvoze.cz/wp-content/uploads/2016/11/katalog_cvvoze.pdf
- [8] Unipolární tranzistor. Tranzistory ovládané elektrickým polem [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.kis.fri.uniza.sk/~ludo/e-Publikacia/elektronika/kap3/>
- [9] Insulated Gate Bipolar Transistor. *Electronictutorial* [online]. [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/insulated-gate-bipolar-transistor.html>
- [10] "Nový" výrobní proces čipů o jemnosti až 13,5 nm. *ITnetwork.cz* [online]. [cit. 2018-05-29]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/zpravodajstvi/hardware/zprava-info-euvl>